

## 基于MPSO算法的空舰导弹航路规划

刘凡<sup>1</sup>, 黄峰<sup>2</sup>, 程相东<sup>1</sup>, 张筱<sup>1</sup>

(1. 空军西安飞行学院, 陕西 户县 710300; 2. 中国人民解放军 94608 部队, 南京 210022)

**摘要:** 为保证空舰导弹的最佳攻击效果, 借鉴水空介质航行器的相关研究思路, 提出一种将导弹末端突防航路扩展至水下的攻击模式, 并对其全局航路规划进行了研究。首先对目标舰艇对空及对海的综合防御能力进行了分析与建模, 为保证规划算法效率, 利用多种群粒子群优化(MPSO)算法进行寻优搜索, 设计了相应的适应度函数和进化策略, 最后给出仿真算例。仿真结果表明, 该方法可以实现不同介质空间武器全局航路规划。

**关键词:** 空舰导弹; 航路规划; MPSO 算法; 水空介质航行器

**中图分类号:** TJ761.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)12-0054-05

## MPSO Based Route Planning of Air-to-Ship Missiles

LIU Fan<sup>1</sup>, HUANG Feng<sup>2</sup>, CHENG Xiang-dong<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>

(1. Xi'an Flight Academy of PLA Air Force, Huxian 710300, China; 2. No. 94608 Unit of PLA, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** To ensure the best attacking effect of the air-to-ship missiles, an attack pattern extending the endgame penetration route of the missiles to underwater was proposed, referencing to the research idea of air/water trans-media vehicle, and study was made to its global path planning. Analysis was made and a model was established for the comprehensive defense capability of the ship to air and sea. Then, to guarantee the efficiency of the planning algorithm, the Multi-colony's Particle Swarm Optimization (MPSO) algorithm was used for optimal searching. The corresponding fitness function and evolutionary strategy were designed, and simulation was made. The simulation result shows that the algorithm can achieve global path planning to the weapon passing through different media.

**Key words:** air-to-ship missile; route planning; MPSO algorithm; air/water trans-media vehicle

### 0 引言

近年来,水空介质航行器成为诸多学者的研究热点。从文献[1-5]的研究结果可以看出水空介质航行器有着较强的军事价值,主要体现在:水空介质跨越航行器具有水下易于隐蔽、空中攻击速度快的特点,能够大大提高航行器的生存能力,同时具有较好的突防能力。为保证空舰导弹的最佳攻击效果,借鉴水空介质航行器的相关研究思路,提出了一种将导弹末端突防航路扩展至水下的攻击模式,利用多种群粒子群优化(MPSO)算法进行寻优搜索,规划研究空舰导弹全局最优突防航路。

### 1 舰艇防御威胁空间建模

舰队各类装备的防御空间大小和分布在相当程度

上决定了空舰导弹航路规划的结果,需要综合考虑航路规划海区目标舰艇防御力量,如防空预警雷达、防空导弹、速射高炮、反潜鱼雷等因素影响。有必要采用统一的度量方式对各类装备威胁空间进行量化归一,以便空舰突防武器能够衡量突防路径威胁程度。因此采用人工势场理论建立某区域的威胁势场模型,以威胁源为圆心,随着距离的增大,威胁强度以指数递减,即

$$P(r) = Ke^{-kr} \quad (1)$$

式中: $P$ 为威胁强度; $K$ 为威胁源的强度; $k$ 为衰减因子; $r$ 为距离。

影响舰艇综合威胁势场强度 $P$ 的主要因素为舰队各类装备探测、拦截摧毁概率。这里,对于航路规划威胁模型只考虑探测威胁,即认为探测就可最终拦截。

### 2 多种群粒子群优化算法

解决航路规划问题目前常见的算法有粒子群及其改进算法<sup>[6-7]</sup>、蚁群算法<sup>[8]</sup>、遗传算法<sup>[9]</sup>等,但这些算法比较复杂,为保证航路规划算法的效率,本文采用

MPSO 算法。多种群粒子群航路规划方法采用特定的粒子编码方式和适应度函数,同时引入小生境生成进化策略,首先将含有  $N$  个粒子的粒子群划分为两个小生境子种群,生成各自独立的搜索空间。这些小生境子种群在空间上不是隔离的,所有的粒子根据粒子群优化算法在各自的子种群内部进化。当进化结束时,两个子种群将追逐出不同的极值点,即分别生成两条不同空间路径的最优航路,从而为空舰导弹生成不同突防模式的可选航路。

基本粒子群算法(PSO)描述如下<sup>[10]</sup>:假设在  $D$  维搜索空间中,有  $N$  个粒子组成的群体,第  $i$  个粒子在  $D$  维空间中的位置用向量  $X_i$  表示,其飞行速度用  $V_i$  表示,第  $i$  个粒子经历过的最好位置为  $P_{ibest} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ 。在整个群体中,所有粒子经历过的最好位置为  $G_{best} = (g_1, g_2, \dots, g_D)$ ,  $g_j$  为该粒子第  $j$  维所经历的最好位置,MPSO 算法在每一代对第  $i$  个粒子在第  $j$  维 ( $1 \leq j \leq D$ ) 上的更新速度和位置为

$$V_{ij}(t+1) = w(t)V_{ij}(t) + c_1r_1(P_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2r_2(g_j(t) - x_{ij}(t)) \quad (2)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + V_{ij}(t+1) \quad (3)$$

$$w(t) = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{T_{max}}t \quad (4)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, D$ ;  $c_1, c_2$  为学习因子,是常数; $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数; $w(t)$  为惯性权重,取值范围为  $[w_{min}, w_{max}]$ ;  $t$  表示第  $t$  代粒子; $T_{max}$  为最大进化代数。

PSO 算法中粒子编码是算法的核心问题。为了简化计算,提高算法效率,在二维平面内考虑粒子编码。首先将航路起点与目标点在  $x$  方向上做  $n+1$  等分,在  $n$  个等分线上对坐标进行随机初始化,然后以路径上位于规划起点与目标点之间的  $n$  个等分点的坐标值作为粒子编码,如图 1 所示。

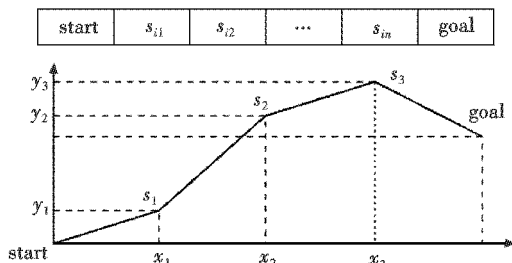


图 1 粒子编码示意图

Fig. 1 The schematic plot of particle coding

假设将粒子总数为  $N$  的粒子群中的粒子表示为  $S_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in})$ , 则第  $i$  个粒子初始位置的算式为

$$s_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$x_{ij} = x_{start} + j \times (x_{goal} - x_{start}) / (n + 1) \quad (6)$$

$$y_{ij} = y_{start} + R \times (y_{goal} - y_{start}) / (n + 1) \quad (7)$$

式中: $(x_{start}, y_{start})$  为规划起点坐标; $(x_{goal}, y_{goal})$  为规划终点坐标; $R$  为  $[0, 1]$  上的随机数。通过该编码可知每个粒子代表规划空间中的一条路径,即由一系列的坐标点: $(x_{start}, y_{start}), (x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2}), \dots, (x_{in}, y_{in}), (x_{goal}, y_{goal})$  构成。每个粒子的起始点和终点是不变的。

### 3 空舰导弹航路规划 MPSO 算法设计

由于反舰导弹在自控飞行段内大多采用定高等势的掠海飞行方式,为方便起见,可以进行必要的纵向简化,其航路规划在二维平面上展开<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 航路规划适应度函数构造

航路规划的目标就是在满足物理性能约束和任务约束的前提下,生成隐蔽突防、威胁回避的飞行航路,提高导弹生存概率。为此,采用以下代价函数

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\gamma \cdot (l_i + t_i) + (1 - \gamma) \cdot f_i] \quad (8)$$

式中: $l_i$  表示起点为  $i$  的航路段路径的欧式距离; $f_i$  为节点  $i$  的威胁等级指数,引入威胁等级因素的目的是使航路选择威胁最小的区域通过; $t_i$  为通过航路段起点  $i$  的相对时间,  $t_i = l_i / v_i$ ,  $v_i$  为通过航路段起点  $i$  的相对速度,与路径所在的介质空间距离及武器的性能有关; $\gamma$  为相对加权系数; $n$  为粒子编码方式中的等分数。不同量纲的指标取规一化处理后的结果值。已知威胁源  $j$  的威胁半径,  $f_i$  的算式为

$$f_i^k(x, y) = \begin{cases} f_i^1(x, y) & k = 1 \\ f_i^2(x, y) & k = 2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f_i^1(x, y)$  为节点  $i$  的对空威胁指数; $f_i^2(x, y)$  为节点  $i$  的水下(对潜)威胁指数。其中

$$f_i^k(x, y) = \begin{cases} 1 & r^k \leq r_j^k \\ 0 & r^k > r_j^k \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $r^k$  为  $k$  介质空间,武器飞行过程中的即时位置  $i(x_i, y_i)$  到威胁源  $j$  的位置  $(x_j, y_j)$  的距离。

#### 3.2 MPSO 算法进化策略

在 PSO 算法中,每个粒子通过跟踪 2 个极值来更新自己:1) 粒子本身目前找到的最好位置,即个体极值;2) 整个子种群目前找到的最好位置,称为全局极值。若控制了子种群中最优个体的搜索方向,也就控制了整个种群的搜索方向。MPSO 小生境进化策略通过控制子种群之间的排挤和竞争,使各个子种群在进化中动态地形成各自独立的搜索空间,从而实现多个局部极值进行同步搜索。此外,进化策略只对各个子种群中的最优个体进行控制,从而减少了计算量,加快了运算速度,也避免了算法的早熟收敛。

算法具体描述如下:设 MPSO 算法种群中含有  $N$  个粒子,包含两个子种群。

种群一,维持同一小生境环境,任何时候,适应度函数空间环境只取  $k=1$  的情况,子种群中最优个体为  $P_{1best}$ 。

种群二,维持在另一个小生境环境,只要满足条件,适应度函数空间环境取值  $k=2$ ,子种群中最优个体为  $P_{2best}$ 。 $k$  为航路穿越介质空间环境参数。

- 1) For  $i=1$  to  $n$ ,  $k=1$ ,  $l_{break}$ ;
- 2) if  $k=1$ 

$$f_i = f_i^1(x, y);$$
- 3) if  $i \geq i_{break}$ 

$$k = \text{rand}(1, 2);$$
- 4) if  $k=2$ 

$$f_i = f_i^2(x, y), l_{break} = i$$

$$\text{else } f_i = f_i^1(x, y);$$
- 5) if  $K=1$  and  $F(P_{1best}) \geq F(P_{2best})$ 

$$P_{1best} = P_{2best};$$
- 6) if  $K=2$  and  $F(P_{2best}) \geq F(P_{1best})$ 

$$P_{2best} = P_{1best}。$$

算法首先设置子种群进化空间(1~2)),如果进化满足时机,种群进化分为两个子种群(3~4)),进化保持种群空间,记录路径穿越节点  $l_{break}$ ;比较两个小生境最优个体的适应度,高者置无穷大,低者保持不变并根据进化属性设置为子种群的最优个体(5~6))。

对设置为无穷大的个体重新初始化,并在小生境内重新选择优良个体,转至1)使每个小生境子种群形成不同的独立搜索方向寻找极值。

### 3.3 MPSO 算法描述

空舰导弹航路规划的目的是为了获得不同的两条航路,即求出代价函数在航路规划空间上的两个局部极小值。在本文算法中,每个粒子代表一条航路。系统首先随机地生成大小为  $N$  的两个初始粒子种群,利用航路属性和航路约束来检查种群粒子的有效性。根据航路在介质空间中的分布,对种群利用小生境竞争策略,在航路规划空间内构造两个不同的小生境种群。在每个小生境粒子群中,对算法粒子群进行速度和位置更新,种群的全局极值仅约束自己的小生境群体。算法中引入种群淘汰策略,每隔一定代数淘汰或替换部分种群,这样可使种群在不断竞争和更新中向前进化;其他优良的小生境种群继续向前进化,这又保证了搜索精度的连续提高。适当时候,对子种群中所有个体进行评价并排序。当进化过程中航路代价函数稳固或达到设定的迭代次数后,运算终止,提取出最优个体,即所求的航路。

基于多种群粒子群算法的海/空航路规划算法具体步骤描述如下:

- 1) 随机初始化粒子种群,并将其划分为两个子

种群;

2) 根据航路约束和航路评价函数,计算每个粒子适应度,对无效的重新初始化;

3) 实施小生境进化策略,确定每个小生境独立搜索空间的最优个体;

4) 每隔一定代数,对最劣小生境子种群更新初始化;

5) 对每个小生境种群独立优化;

6) 如果代价函数趋于稳定或达到最大迭代数,则停止迭代,并输出最优解,否则转步骤2)。

## 4 仿真和分析

本文通过固定粒子群规模、粒子维数及最大迭代次数,对算法在 Matlab7.0 环境下进行了仿真实验,采用了  $15 \times 9$  矩阵平面表示数字海洋地图以及其中的威胁源数据。

### 4.1 仿真设置

- 1) 参数设置。

背景环境设置 8 个不同威胁源,归一化处理后位置坐标分别为:  $A(2.5, 1.8)$ ,  $B(3.5, 7.1)$ ,  $C(5.2, 2.5)$ ,  $D(7.5, 5.1)$ ,  $E(8.4, 7.4)$ ,  $F(10.3, 2.7)$ ,  $G(10.8, 5.8)$ ,  $H(12.5, 8.1)$ , 空舰导弹起始坐标为  $S(0, 0)$ , 目标舰艇  $T(15.0, 9.0)$ , 如图 2~图 4 所示,武器空中航行速度恒定,航路规划空间威胁源的威胁等效半径设置如表 1 所示(因为软件仿真,故本文参数单位均为无量纲单位)。

仿真相关参数值为:初始群体规模  $N=40$ ,仿真实验中起始权重  $w_{max}=0.8$ ,终止权重  $w_{min}=0.2$ ,学习因子  $c_1=c_2=2$ ,最大迭代次数  $T_{max}=300$ ,粒子速度范围  $[-10, 10]$ ;航路可穿越节点位置  $i_{break}=8$ 。

- 2) 仿真设计 1:验证 MPSO 算法的有效性。

设置航路规划时,武器航行的相对速度分别为:空中航行速度为  $v^1$ ,水下航行速度  $v^2$ ,相对速度比值  $\delta = v^1 : v^2$ ,设置  $\delta=1$ ,指标相对加权系数  $\gamma=0.4$ ,在图 2 航路规划区域二维平面中,圆圈表示威胁等效覆盖区域,灰色表示空中威胁等效覆盖区域,蓝黑色表示水下等效覆盖区域,威胁等效半径参数见表 1。

表 1 海/空空间威胁源威胁等效半径

Table 1 Equivalent radius of the sea/air space threat source

威胁参数	介质环境	A	B	C	D	E	F	G	H
半径	空中	0	2.0	1.0	1.0	0	0.8	1.3	0.8
	水下	0.7	0	0	0	0.6	0	0.9	0.6

图 2 所示为 MPSO 算法在执行到第 30 代时的航路规划投影,此时可以找到多处可行的航路。图 3 所示为 MPSO 算法在执行到第 60 代时的航路投影,此时能够发现近似最优的航路,航路代价函数基本趋于稳定。图 4

所示为 MPSO 算法进化代数  $T = 100$  时,两个子种群的最优结果。

3) 仿真设计 2:对比验证航行速度和环境威胁因素影响。

设置海/空空空间航行相对速度比值  $\delta$  分别取 1 和 3,指标相对加权系数  $\gamma$  分别取 0.4 和 0.6。选取 4 组不同的  $\gamma, \delta$  参数对比跨越海/空介质空间( $k = 2$ ) 航路规划目标代价函数变化曲线,如图 5 所示。

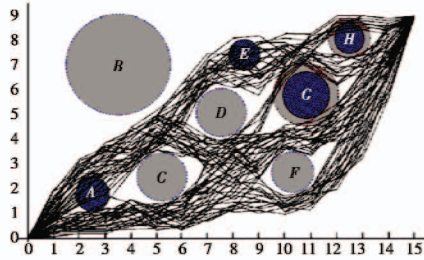


图 2  $T = 30$  时的航路规划投影示意图

Fig. 2 The projection plot of path planning when  $T = 30$

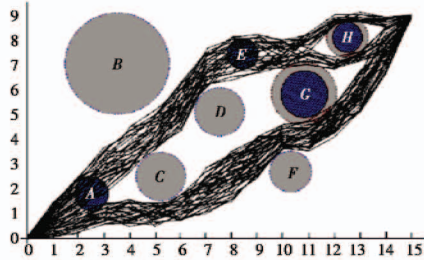


图 3  $T = 60$  时的航路规划投影示意图

Fig. 3 The projection plot of path planning when  $T = 60$

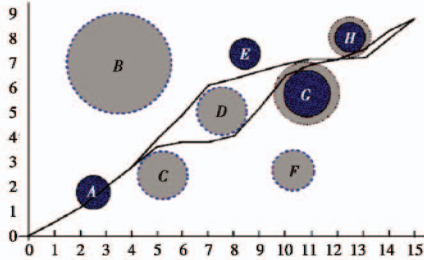


图 4 进化代  $T = 100$  时的最优航路规划图

Fig. 4 The optimal path planning plot when  $T = 100$

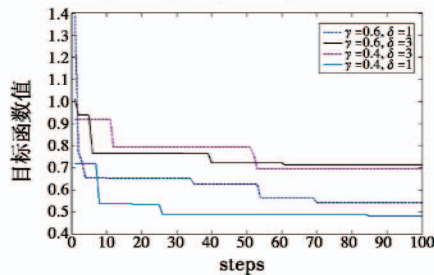


图 5 不同参数下海/空空空间航路规划目标代价函数变化曲线图

Fig. 5 The optimal path planning objective cost function curves with different parameters

由图 5 得到 4 组不同参数  $\gamma, \delta$  条件下的目标函数仿真结果,见表 2。

表 2 仿真参数及最优路径目标函数结果

Table 2 Simulation parameters and the results of the target function for the optimal path

次数	参数 $\gamma$	参数 $\delta$	仿真结果
1	0.4	1	0.487
2	0.6	1	0.533
3	0.4	3	0.693
4	0.6	3	0.726

### 4.2 仿真分析

1) 从图 2 和图 3 对比可看出,算法进化到第 30 代时可找到多条可行的航路,从威胁源  $B$  一侧穿过,分别包围威胁源  $C, D, F$  形成大约 3 处航路;当算法在进化到第 60 代时,受威胁源  $E$  威胁因素的影响,代价函数较高,航迹逐渐消退为 2 处包围威胁源  $C, D$  的航路;算法设置在航路允许穿越节点位置  $i_{break} = 8$ ,武器具有两种路径突防方式,在威胁源  $G$  附近,有的种群粒子选择空中路径,即绕开空中威胁等效圆(灰色);有的种群粒子选择转入水下路径。

2) 从图 4 可看出,算法进化到第 100 代时,虽然规划空间内有威胁源  $C, D, E, G, H$  的影响,航迹最终退化形成不同介质空间的 2 条最优规划路径:一条是空中突防模式规划的航路,绕开威胁源  $G, H$  空中灰色威胁等效圆区域;另一条是水下突防模式规划的航路,穿越威胁源  $G, H$  空中灰色威胁等效圆区域,并绕开水下威胁等效圆区域(蓝黑色),实现了算法不同空间的寻优能力。

3) 从图 5 可以看出,武器跨海/空空空间突防时,对于一定的空中航行速度,如果水下相对航行速度低( $\delta = 3$ ),航路规划时间代价就大,则仿真结果目标代价函数值就高(0.726, 0.693),武器航路受到武器突防模式的影响。

### 5 结束语

为保证空舰导弹的最佳攻击效果,本文借鉴水空介质航行器的相关研究思路,提出了一种将导弹末端突防航路扩展至水下的攻击模式,并对其全局航路规划进行了研究。针对舰艇编队空间防御拦截体系协同特点,对舰艇防御威胁空间进行建模,综合考虑目标舰艇对空及对海的综合防御能力,采用 MPSO 算法进行不同介质空间武器全局航路规划,该算法利用粒子群算法中的多种群全局寻优及小生境方法中的种群之间的竞争机制,使不同介质空间内各个极值点在各自的小生境内同时进化,形成了新的航路规划优化算法,保证了航路规划算法对海/空空空间搜索的完备性。仿真

结果表明,该方法可行、有效,能够用于不同介质空间武器全局航路规划,可以大大提高导弹的攻击效果。

### 参 考 文 献

- [1] 齐铎,冯金富,李永利. 具有水空介质跨越能力的反舰武器[J]. 飞航导弹,2014(11):78-80,96. (QI D, FENG J F, LI Y L. Air/water trans-media anti-ship weapons [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(11):78-80,96. )
- [2] 齐科,冯金富,张晓强,等. 升力型潜水飞行器水空动力学特性研究[J]. 舰船科学技术,2014,36(9):94-97,105. (LIN K, FENG J F, ZHANG X Q, et al. Research on the aerodynamic/hydrodynamic characteristic of lifting submersible aircraft [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(9):94-97,105. )
- [3] 尹翔,冯金富,齐科,等. 基于 Creator 和 Vega 的水空跨越飞行器视景仿真[J]. 飞行力学,2013,31(5):477-480. (YIN X, FENG J F, LIN K, et al. Visual simulation of air/water trans-media vehicle based on Creator and Vega [J]. Flight Dynamics, 2013, 31(5):477-480. )
- [4] 徐保伟,冯金富,齐铎. 航行器出水过程动力学建模 [C]//2013 年博士生论坛,2013:2-5. (XU B W, FENG J F, QI D. Dynamics modeling of vehicle exiting-water process [C]//The Doctor Forum of 2013, 2013:2-5. )
- [5] 张佳强,冯金富,谢奇峰,等. 适应水-空介质航行的共形半环翼布局概念研究[J]. 空气动力学学报,2012,30(5):685-691. (ZHANG J Q, FENG J F, XIE Q F, et al. Research on concept of conformal semi-ring wing configuration for water-air medium voyage [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(5):685-691. )
- [6] 王磊,施荣华. 基于粒子群算法的无人机航路规划与建模仿真[J]. 计算机仿真,2011,28(4):74-77. (WANG L, SHI R H. Application of particle swarm optimization algorithm to path planning of unmanned aerial vehicle [J]. Computer Simulation, 2011, 28(4):74-77. )
- [7] 魏桥,赵英俊,俞群,等. 改进粒子群算法的巡航导弹路径规划[J]. 电光与控制,2008,15(3):49-52. (WEI Q, ZHAO Y J, YU Q, et al. Cruise missile route planning based on improved PSO algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(3):49-52. )
- [8] 高曼,刘以安,张强. 优化蚁群算法在反舰导弹航路规划中的应用[J]. 计算机应用,2012,32(9):2530-2533,2541. (GAO M, LIU Y A, ZHANG Q. Application of improved ant colony algorithm to route planning of anti-ship missile [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(9):2530-2533,2541. )
- [9] 徐清华,李中良,沈闽峰,等. 基于遗传算法反舰导弹航路规划研究[J]. 火力与指挥控制,2008,33(s2):57-61. (XU Q H, LI Z L, SHEN M F, et al. Study on route program of anti-ship missile based on genetic algorithm [J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(s2):57-61. )
- [10] 于会,于忠,李伟华. 基于小生境粒子群技术的多航迹规划研究[J]. 西北工业大学学报,2010,28(3):415-420. (YU H, YU Z, LI W H. Multiple route planning for air vehicles based on niche particles swarm optimization [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(3):415-420. )
- [11] 刘钢,老松杨,谭东风. 基于功能区域的反舰导弹逆向航路规划[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(4):799-805. (LIU G, LAO S Y, TAN D F. Converse path planning for anti-ship missiles based on operational area [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(4):799-805. )
- (上接第 28 页)
- [8] 张新明,薛占熬,郑延斌. 二维直方图准分的 Renyi 熵快速图像阈值分割[J]. 模式识别与人工智能,2012,25(3):411-418. (ZHANG X M, XUE Z A, ZHENG Y B. Fast and precise two-dimensional Renyi entropy image thresholding [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 25(3):411-418. )
- [9] 张新明,郑延斌. 二维直方图准分的 Tsallis 熵阈值分割及其快速实现[J]. 仪器仪表学报,2011,32(8):1796-1802. (ZHANG X M, ZHENG Y B. Precise 2-D Tsallis entropy image threshold segmentation and its fast recursive realization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(8):1796-1802. )
- [10] 张新明,郑延斌,张慧云. 应用混沌多目标规划理论融合的图像分割[J]. 小型微型计算机系统,2010,31(7):1416-1420. (ZHANG X M, ZHENG Y B, ZHANG H Y. Image segmentation based on combining chaos and multi-objective programming theory [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(7):1416-1420. )
- [11] SATHYA P D, KAYALVIZHI R. Modified bacterial foraging algorithm based multilevel thresholding for image segmentation [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(4):595-615.